第47卷 第3期
2024年3月

干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

Vol. 47 No. 3
Mar. 2024

黄河流域城市生态韧性时空演变特征及影响因素分析

张明斗[1]， 任衍婷[1]， 周 亮[2]

（1. 东北财经大学经济学院，辽宁 大连 116025；2. 兰州交通大学测绘与地理信息学院，甘肃 兰州 730070）

摘 要：科学评估黄河流域城市生态韧性对于塑造流域高质量发展优势与营造韧性宜居环境至关重要。基于"压力–状态–响应–创新"四维框架构建城市生态韧性评价体系，运用核密度估计、Dagum基尼系数等方法考察2011—2020年黄河流域城市生态韧性时序演进、空间分布及空间差异特征，并使用空间杜宾模型剖析其影响因素。结果表明：(1) 黄河流域城市生态韧性有效提升，上中下游各地区演进过程、极化特征不尽相同。(2) 城市生态韧性空间格局呈"下游–中游–上游"梯度递减，空间集聚与区域分异特征明显。(3) 城市生态韧性总体及区域内差异波动式下降，区域间差异是空间差异主要来源，年均贡献率高达65.44%。(4) 降水量、经济发展水平、公共安全建设对黄河流域城市生态韧性提升具有正向影响，对外开放水平存在正向溢出效应，基础设施建设、政府干预程度在提升当地城市生态韧性过程中也呈现出正向溢出效应，而土地开发强度、环境污染程度会抑制城市生态韧性提升，且环境污染程度还存在负向溢出效应。此外，黄河上中下游各地区影响因素效果差异显著。

关 键 词：城市生态韧性；时空演变；空间差异；影响因素；黄河流域

文章编号：1000－6060(2024)03－0445－10(0445～0454)

工业革命推动人类进入物质生活丰富的工业文明时代，但无边界、无节制、不可逆转的生产和生活方式潜移默化影响着生态系统，气候变化、环境污染、生态破坏、资源短缺等问题层出不穷，严重削弱生态承载力、增加生态风险，威胁到区域乃至整体生态安全，导致生态韧性降低[1]。在此背景下，我国提出了"绿水青山就是金山银山"、美丽中国建设及城市韧性建设等理念，明确指出："要持续深入打好蓝天、碧水、净土保卫战，推动重要江河湖库生态保护治理，提升生态系统多样性、稳定性、持续性"。作为横跨我国东中西三大板块的生态廊道，黄河流域成为践行生态文明建设和守护生态安全的关键性与战略性地带。然而，黄河流域沿线各省区产业倚能倚重、低质低效，生态系统退化、水土流失严重、生态流量偏低等问题日益凸显[2]，生态系统的一系列扰动将影响黄河流域高质量发展前景，成为维护城市生态安全与提升生态韧性的障碍。城市生态系统具有时空交织的复杂性及易受多因素影响的相对脆弱性[3]，科学评估黄河流域城市生态韧性的时空演变与空间差异，系统性甄别出其影响因素，有助于明确黄河流域城市生态韧性的基本状态及未来走向，缩小区域发展差距，对于塑造黄河流域高质量发展优势与营造富有韧性的宜居环境，建成中国高质量生态安全示范区意义重大。

21世纪以来，为适应湿地城市[4]、生态城市[5]及智慧城市[6]等建设需求，城市生态韧性引起了学术界和社会广泛关注，但其仍是一个新兴话题，相关研究尚存在争议之处与探索空间。城市生态韧性是基于"社会–生态"系统的韧性[7]，体现了生态系统面临压力与扰动时始终保持抗压、响应恢复及学习创新的动态能力[8]，具有人类影响主导、社会经济驱动等特点。相关研究主要涉及以下3个方面：

收稿日期：2023-07-21； **修订日期**：2023-09-09

基金项目：国家自然科学基金项目(71804021)；辽宁省"兴辽英才计划"青年拔尖人才项目(XLYC2007123)资助

作者简介：张明斗(1983-)，男，博士，教授，主要从事城市经济研究. E-mail: zhangmingdou0537@126.com

通讯作者：周亮(1983-)，男，博士，教授，主要从事生态环境经济与政策研究. E-mail: zhougeo@126.com

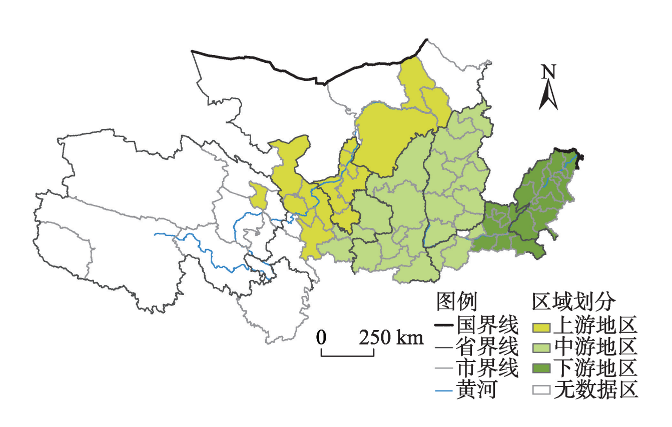
（1）评价模型。多数学者从韧性特征出发，从抵抗力、适应力和恢复力[3,9]、敏感性和适应性[10]、脆弱性和响应能力[11]等维度建立城市生态韧性评价体系；王松茂等[8]则进一步从演化韧性视角提出评价生态韧性还应考虑城市生态系统的创新发展能力。部分学者还使用"驱动力–压力–状态–影响–响应"（DPSIR）框架[7,12]对城市生态韧性进行量化评估。（2）研究尺度及内容。城市生态韧性的研究尺度包括全国[11,13]、区域[3,14]、城市群[8,10]、都市圈[7]以及生态脆弱区[15]等层面，研究内容涵盖了生态韧性的时序变化与空间分布、多维差异的结构变化以及障碍因子和驱动机制等多方面。（3）影响因素及方法选择。相关学者识别城市生态韧性影响因素的方法涉及障碍度模型[7–8]、STIRPAT模型[3,16]、多元线性回归模型[10]、动态回归模型和Shapley值分解[13]；影响因素包括降水、温度、建设用地等生物地理指标和经济发展、对外开放、环境改善投资等社会经济因子。

纵观已有研究，从评价体系来看，现有研究侧重分析城市在抵抗干扰、适应恢复等方面的能力，较少将城市生态系统学习创新能力考虑在内，难以契合城市生态韧性的本质内涵。从研究尺度及内容来看，已有研究对作为我国重要生态安全屏障的黄河流域关注较少，缺乏对黄河全流域城市的相关分析；研究内容更多关注于城市生态韧性时空演变这一现实状态，而缺乏对诸如空间差异及其来源的分析和探讨。从影响因素方法选择来看，既有研究较少运用空间计量模型来分析城市生态韧性影响因素，难以考虑其空间溢出效应。基于此，本文以黄河流域54个地级及以上城市为研究对象，基于"压力–状态–响应–创新"四维框架构建城市生态韧性评价体系，在揭示其时空演进特征基础上，采用Dagum基尼系数更精确地反映其空间差异及具体来源，再运用空间杜宾模型深入剖析黄河流域城市生态韧性的影响因素，旨在甄别出黄河流域城市生态韧性时空分异的驱动机制，为黄河流域城市生态韧性的协同提升提供经验支撑。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

以黄河流域自然范围为基础，考虑研究地域单元的完整性、区域发展与黄河直接关联性，并参考相关研究成果[17–18]，本文将研究区域界定为黄河流经的青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙古、陕西、山西、河南、山东9个省区共计69个地区（州、盟、市）。囿于阿拉善盟、乌海市、果洛藏族自治州等州市数据缺失严重，最终确定54个地级及以上城市（图1）。并以内蒙古河口镇和河南桃花峪作为上中游和中下游分界线，将研究区域划分为上中下游3个地区[17]。



注：该图基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为GS(2019)1822号的标准地图制作，底图边界无修改。下同。

图1 研究区示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the study area

1.2 数据来源

数据主要来源于2012—2021年《中国城市统计年鉴》《中国城市建设统计年鉴》《国民经济和社会发展统计公报》《科技经费投入统计公报》、各地级及以上城市统计年鉴和政府财政决算报告、中国经济数据库（CEIC）。此外，人均专利授权数量指数源自北京大学开放研究数据平台发布的"中国区域创新创业指数"；归一化植被指数（NDVI）、年均降水量来源于中国科学院资源环境科学数据中心，$PM_{2.5}$年均浓度来源于美国达尔豪斯大学大气成分分析组织发布的全球地面$PM_{2.5}$浓度年均值，借助ArcGIS 10.8软件将原始数据进行合成处理。对于个别缺失数据，采用插值法填补。为了剔除价格因素的影响，本文对指标体系及控制变量中涉及价格因素的指标，统一按照2011年的不变价格进行平减。

1.3 研究方法

1.3.1 城市生态韧性测度 "压力–状态–响应"（PSR）模型体现了人类与环境间的相互作用，成为研究生态环境问题的框架体系[19]。同时，现有研究已将演化韧性认知范式作为城市韧性研究的参照基准[8,20]。在演化韧性框架中，韧性表征了区域的适

应性、创新性与可持续性，创新能力是其最关键的一项能力[21]；对于城市生态韧性而言，城市生态系统维持长期发展、创造新增长路径能力与抵御短期冲击、自我调适恢复能力同等重要[22]。本文借鉴PSR模型并基于演化韧性视角，立足于城市生态韧性的本质内涵，并参考相关学者的研究[8,23]，拟从“压力-状态-响应-创新”四维框架构建城市生态韧性指标体系（表1）。该框架既考虑人类活动与生态环境间因果关系，又兼顾城市生态系统基础功能和学习创新的社会属性[8,24]，即人类资源索取、经济活动对城市生态系统造成负荷与干扰，在资源退化、环境污染压力下，生物资源、生态环境及生态空间会发生改变，而人类社会会采取多样化措施作出响应，最终通过创新适应达到生态韧性进化[8]，“压力”“状态”“响应”“创新”紧密联系，构筑城市生态韧性的内部机理与演进过程。

1.3.2 组合赋权法 为兼具主客观信息表达，本文采用“功能驱动”和“差异驱动”相结合的主客观赋权法[25]，对城市生态韧性进行科学测度。其中，主观赋权法采用等权赋值法[26]，城市生态韧性提升是各维度复合嬗变的系统演进过程，各维度从不同侧面体现生态韧性的本质内涵，可能具有同等重要性。客观赋权法采用熵值法，其根据指标的信息熵客观赋权，能够深刻反映指标的区分能力。采用主客观组合赋权法在一定程度上能够避免主观赋权法中主观因素的决定性作用及熵值法忽略指标本身重要程度的缺点，达到优化权重效果。具体计算公式参见文献[25]。

1.3.3 核密度估计 核密度估计主要利用连续的密度曲线描述随机变量的分布特征，具有模型依赖性弱、稳健性强等优点。本文运用核密度估计分析黄河流域城市生态韧性的时序演进。具体公式参见文献[27]。

1.3.4 Dagum基尼系数 泰尔指数和经典基尼系数等传统的不平等程度测算指标较为苛刻地限定了分组样本间不存在交叉重叠部分，而Dagum基尼系数及其按子群分解法有效解决了该问题[28]。本文基于Dagum基尼系数揭示黄河流域城市生态韧性的空间差异，并分析其差异的具体来源与贡献。具体公式参见文献[27]。

1.3.5 空间杜宾模型 已有研究表明，城市生态韧性存在显著的空间关联性[8,12]，若忽略空间因素则会影响结果的准确性，因此，本文借鉴车磊等[29]构建空间杜宾模型来分析黄河流域城市生态韧性的影响因素，模型如下：

$$\ln CER_{it} = \rho\sum_{j=1}^{n} W_{ij}\ln CER_{it} + \beta\ln X + \gamma\sum_{j=1}^{n} W_{ij}\ln X + \mu + \lambda + \varepsilon \quad (1)$$

表1 城市生态韧性指标体系

Tab. 1 Index system of urban ecological resilience

目标层	准则层	指标层	指标含义	属性	权重
城市生态韧性	压力维度	单位GDP供水量/10^{-4} m^3·元$^{-1}$	城市水耗强度	−	0.038
		单位GDP能源消费量/10^{-4} tce·元$^{-1}$	城市能耗强度	−	0.041
		单位GDP建设用地占用面积/10^{-8} km^2·元$^{-1}$	城市地耗强度	−	0.042
		单位GDP工业二氧化硫排放量/10^{-8} t·元$^{-1}$	环境污染强度	−	0.040
	状态维度	单位面积水资源总量/m^3·km^{-2}	水资源丰富度	+	0.123
		归一化植被指数（NDVI）	生物资源水平	+	0.065
		人均公园绿地面积/m^2·人$^{-1}$	生态宜居空间	+	0.070
		建成区绿化覆盖率/%	城市绿化水平	+	0.046
	响应维度	污水处理厂集中处理率/%	环境治理响应	+	0.040
		生活垃圾无害化处理率/%	人居环境改善	+	0.038
		一般工业固体废物综合利用率/%	废物综合利用	+	0.056
		节能环保支出占地方财政支出比/%	环保投入强度	+	0.075
	创新维度	研究与试验发展（R&D）经费投入占GDP比/%	研发投入强度	+	0.137
		科学技术支出占地方财政支出比/%	科技投入强度	+	0.141
		人均专利授权数量指数	创新产出水平	+	0.048

注：+、−分别表示正向指标、负向指标；人均专利授权数量指数按照5:3:2的权重对人均发明专利、人均实用新型专利、人均外观设计专利3个子指标进行加总。

式中：CER_{it}为城市i在t年的生态韧性水平；n为城市数目；ρ为空间自相关系数；X为影响因素；β、γ分别为影响因素的回归系数、空间滞后项系数；W_{ij}为城市i与城市j空间二阶邻接矩阵[29]；μ、λ分别为个体、时间固定效应；ε为误差项。此外，为了减弱异方差与多重共线性，本文对变量取对数处理。

2 结果与分析

2.1 黄河流域城市生态韧性的时序演进特征

本文通过MATLAB R2020a软件绘制核密度估计图(图2)，以此展现黄河流域城市生态韧性的时序演进特征。

(1) 主峰和分布形态特征。黄河流域及上中下游各地区分布曲线均逐渐右移，城市生态韧性有效提升；与2011年相比，2020年主峰高度明显提升，城市生态韧性差距有所缩小，但各地区演进过程有所不同。黄河流域及中游地区主峰高度呈“上升-下降-上升-下降”的“M”型变化，主峰宽度呈“收窄-拓宽-收窄-拓宽”变化，城市生态韧性差异程度呈现出“W”型演变规律。上下游地区分布曲线始终为窄而尖形态，主峰高度呈波浪形变化，上游地区“五升四降”、下游地区“三降三升”，区域内差异波动幅度较大。

(2) 分布延展性特征。黄河流域分布曲线期初左右拖尾并存，随着时间推移，右拖尾基本维持不变，左拖尾逐年缩短、分布延展性存在收缩趋势，即生态韧性低水平城市存在“俱乐部趋同”、高水平城市存在“等级锁定”。上下游地区不存在拖尾现象，中游地区则存在较为明显的右拖尾，且分布延展性有所拓宽，“领先”地区存在优者更优效应。

(3)波峰数量和极化特征。黄河流域由双峰逐渐向单峰过渡，但主峰峰值总体增高，城市生态韧性分化态势不明显。上游地区由多峰(2010—2015年)向双峰(2016—2020年)演进；中游地区则始终表现为“多峰-双峰”相渐分布；上中游地区城市生态韧性具有两极或多极分化的区域集聚特征；但中游地区主峰峰值明显高于侧峰且峰间距较大，分化现象较为明显；而下游地区单双峰相间出现，最终在2020年出现主侧峰高度、距离相近的双峰，呈轻微两极分化。

2.2 黄河流域城市生态韧性的空间演变特征

2.2.1 空间分布特征 本文通过ArcGIS 10.8软件利用自然间断点分级法将黄河流域城市生态韧性划分为低、中低、中高及高水平进行空间可视化(图3)。黄河流域城市生态韧性呈“下游-中游-上游”

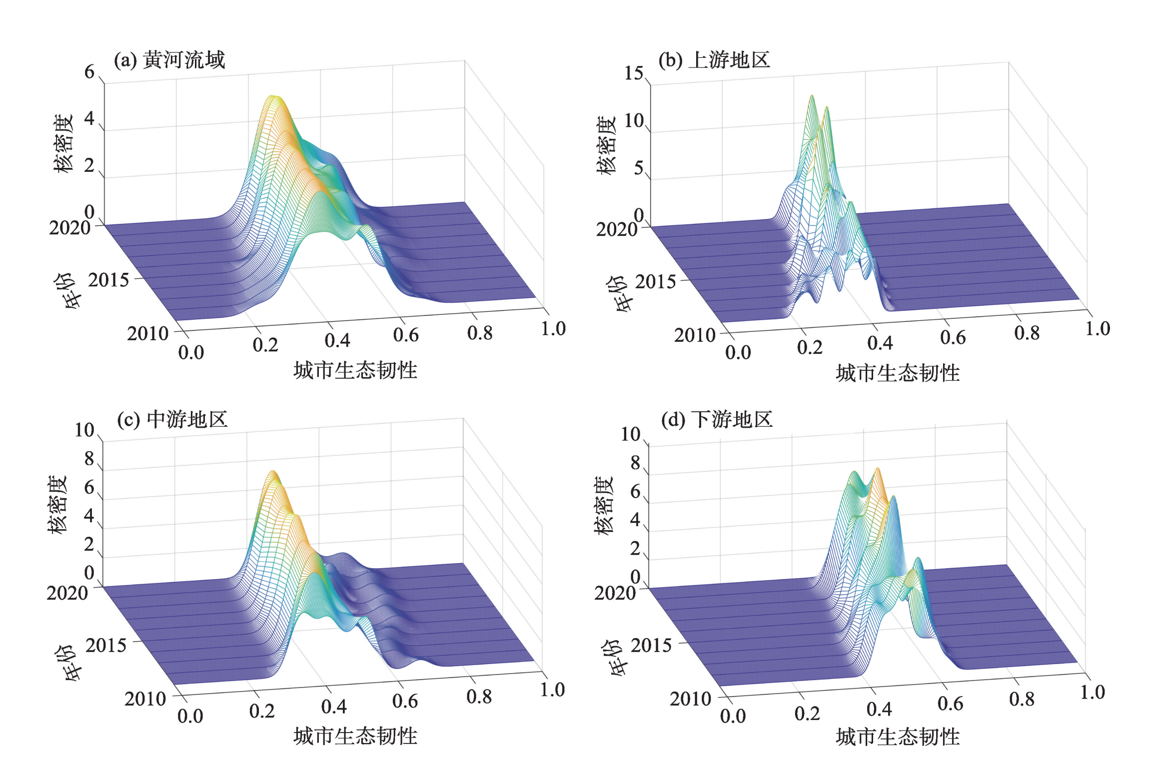


图2 黄河流域城市生态韧性的核密度估计

Fig. 2 Kernel density estimation of urban ecological resilience in the Yellow River Basin

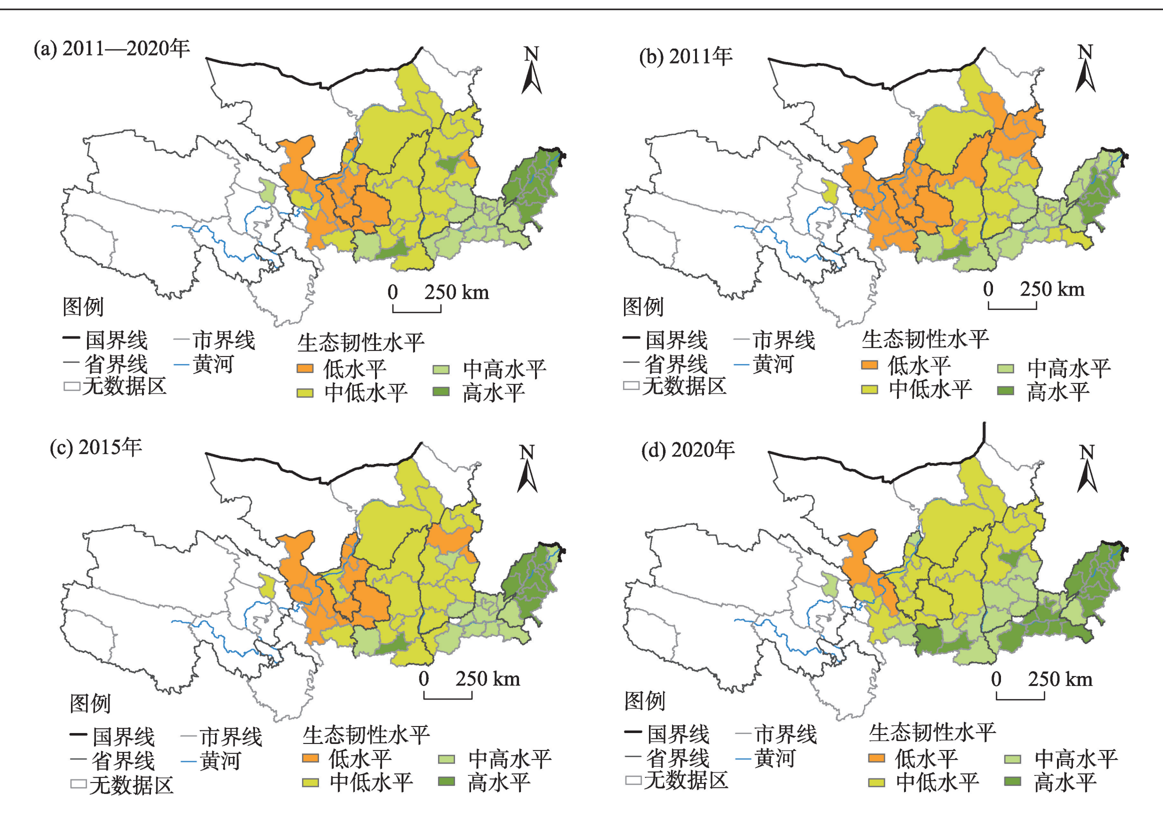


图3　黄河流域城市生态韧性的空间分布

Fig. 3　Spatial distribution of urban ecological resilience in the Yellow River Basin

梯度递减空间格局，空间集聚与区域分异特征明显。由图3a可知，2011—2020年，城市生态韧性由沿海到内陆呈“高-中高-中低-低”四级阶梯格局。下游地区的山东城市生态韧性较高，除了菏泽，其余城市均位于高水平；中高水平集聚在处于中下游地区的河南；中低水平在中游地区连片分布，其中山西与陕西68.42%的城市位于中低水平；上游地区约半数城市位于低水平，其中宁夏与甘肃城市生态韧性整体较低。

由图3b~d可知，随着时间演进，城市生态韧性较高区域由下游向上游、由沿海向内陆进行延伸。上游地区呈现“北高、南低”空间分布，中低水平城市范围扩散明显，2011年低水平城市连片成团分布，占比达76.92%，2020年仅有白银、武威仍位于低水平。中游地区始终呈“东高、西低”分布，但由“中高-中低-低”三级梯度演变为“中高-中低”二级梯度格局。下游地区空间分布由“单中心”逐渐向“双中心”发展，依托济南、郑州两大省会城市，生态韧性高水平区域不断向外围辐射扩散，至2020年，该地区高水平城市占比达到81.25%，仅有安阳、濮阳以及菏泽仍位于中高水平。

2.2.2　空间差异特征　本文通过MATLAB R2020a软件计算Dagum基尼系数，并绘制差异变化趋势图（图4、图5），以此揭示黄河流域城市生态韧性空间差异的具体来源及贡献。

（1）总体及区域内差异

由图4可知，黄河流域基尼系数由2011年的0.125降至2020年的0.086，降幅达到31.20%，党的十八大以来我国掀起了生态保护浪潮，黄河流域各

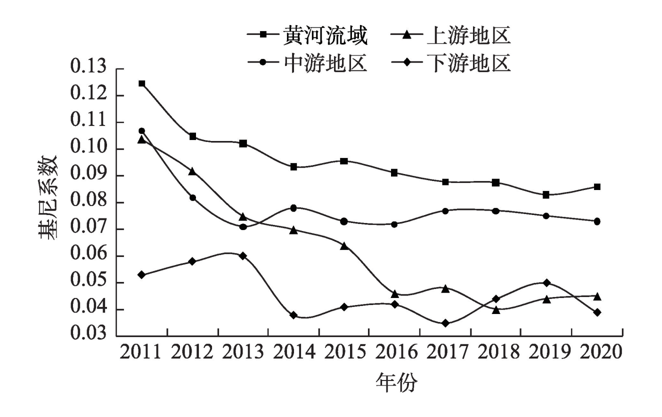


图4　黄河流域城市生态韧性总体及区域内差异

Fig. 4　Overall and intra-regional differences of urban ecological resilience in the Yellow River Basin

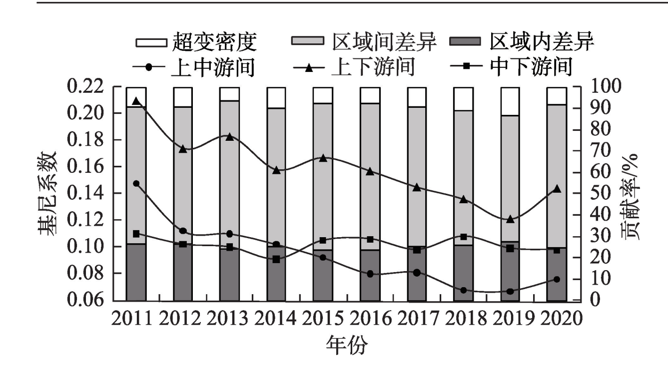


图5 黄河流域城市生态韧性区域间差异及贡献率

Fig. 5 Inter-regional differences and contribution rates of urban ecological resilience in the Yellow River Basin

地区统筹推进资源节约、环境治理等,城市生态韧性空间非均衡性得到有效缓解。各区域基尼系数均值排序为:中游(0.079)>上游(0.063)>下游(0.046),可见中游地区内部差异最大。各区域内部差异呈递减趋势,上游和中游地区大致呈"下降-上升-下降-上升"的"W"型变化特征,下游地区则经历反复涨跌更替的波动过程,降幅排序为:上游(56.73%)>中游(31.78%)>下游(26.42%),上游地区内部发展不均衡情况得到极大改善,最终接近下游地区内部差距。

(2) 区域间差异

由图5可知,区域间基尼系数均值排序为:上下游(0.160)>中下游(0.102)>上中游(0.094),黄河上中下游地区在社会经济发展等诸多方面差异较大,城市生态韧性存在固有差距,其中上下游间差异最大,上中游间差异最小。各区域间差异趋于缩小,上下游间差异呈"下降-上升"交替出现的"W-V"型演变过程;中下游间差异呈小幅度波动下降;上中游间差异仅在2017、2020年轻微增加,基本呈持续下降态势;年均降幅排序为:上中游(7.14%)>上下游(4.11%)>中下游(1.28%)。上游地区在不断追赶中下游地区,缩小与其差距,中下游地区差异相对稳定,黄河流域半数以上资源型城市位于中游地区,资源瓶颈约束效应明显,影响其生态安全和可持续发展,是未来应关注的重点区域。

(3) 差异来源分解

由图5可知,空间差异贡献率均值排序:区域间差异(65.44%)>区域内差异(25.30%)>超变密度(9.26%),黄河流域上中下游地区城市生态韧性呈现出不同的"级差化"分异特征,区域间差异是空间差异的主要来源,缩小区域间差异是解决黄河流域城市生态韧性空间非均衡的关键。

2.3 黄河流域城市生态韧性的影响因素

2.3.1 影响因素选取 城市生态韧性受到多种因素综合影响,本文结合城市生态韧性的内涵及以往研究成果[12,16,18],从生态空间环境、社会经济环境2个维度选取具有代表性因子探讨其影响(表2)。

2.3.2 影响因素分析 为了细致展现各因素对黄河流域城市生态韧性的影响,利用偏微分求解出其直接效应和溢出效应[29](表3)。空间自相关系数(ρ)显著为正,表明城市生态韧性具有显著的正向空间溢出效应,生态韧性较高的城市能够发挥其反哺作用,对周边地区起到引导示范与带动作用。

生态空间环境方面,降水量对黄河流域城市生态韧性的直接效应显著为正,基础设施建设直接效应与溢出效应均显著为正;但土地开发强度、环境污染程度直接效应均显著为负,且环境污染程度还存在负向溢出效应。降水增加有利于黄河流域植被生长,改善植被生态质量,进而提升流域水土保持能力,保障黄河生态屏障。而交通基础设施建设不仅能提升路网通畅性、缓解本地交通拥堵情况、提高城市运行效率,还能降低运输成本、加速区域

表2 城市生态韧性影响因素

Tab. 2 Influencing factors of urban ecological resilience

因素分类	影响因素	测度方法
生态空间环境	降水量(PRE)	年均降水量/mm
	土地开发强度(LU)	城市建设用地面积占城市总面积比重/%
	基础设施建设(INF)	人均道路面积/m^2·人$^{-1}$
	环境污染程度(POL)	工业SO_2、工业废水排放量及$PM_{2.5}$年均浓度采用熵值法构建环境污染指数
社会经济环境	经济发展水平(ECO)	人均GDP/10^4元·人$^{-1}$
	对外开放水平(OPEN)	货物进出口额占GDP比重/%
	政府干预程度(GOV)	环境污染治理投资占GDP比重/%
	公共安全建设(PS)	人均公共安全支出/元·人$^{-1}$

表3 黄河流域城市生态韧性影响因素的空间杜宾模型估计结果

Tab. 3 Spatial Dubin model estimation results of factors affecting the urban ecological resilience in the Yellow River Basin

变量	黄河流域		上游地区		中游地区		下游地区	
	直接效应	溢出效应	直接效应	溢出效应	直接效应	溢出效应	直接效应	溢出效应
PRE	0.052*(1.88)	0.097(1.12)	0.025**(2.51)	0.028(0.76)	0.020*(1.76)	0.043(1.55)	−0.011(−0.66)	0.030(1.47)
LU	−0.048***(−2.66)	−0.050(−1.02)	−0.030*(−1.88)	−0.286***(−4.77)	−0.042***(3.76)	0.166***(4.06)	−0.027***(−2.86)	0.028(1.01)
POL	−0.017*(−1.81)	−0.045*(−1.94)	−0.001(−0.13)	−0.044*(−1.70)	−0.034***(−5.21)	−0.057***(−3.04)	−0.016***(−3.08)	−0.053***(−3.98)
INF	0.048***(3.60)	0.103***(2.63)	0.040***(3.06)	0.090(1.27)	0.002(0.24)	−0.005(−0.16)	0.036*(1.76)	−0.009**(2.03)
ECO	0.182***(3.75)	−0.010(−0.10)	0.131***(3.17)	−0.180**(−2.33)	0.043(1.39)	−0.014**(−2.01)	0.072***(2.92)	0.167***(2.97)
OPEN	0.009(1.00)	0.032**(2.08)	−0.005**(−2.25)	0.048***(2.65)	0.001(0.34)	0.020(1.61)	0.007**(2.33)	−0.015(−1.34)
GOV	0.012**(1.99)	0.034*(1.82)	−0.029***(−2.86)	0.022(1.20)	0.019**(2.47)	−0.022**(−1.98)	−0.028***(−4.58)	0.012(1.11)
PS	0.066*(1.91)	0.026(0.29)	0.064**(2.23)	0.078(0.83)	0.065**(1.97)	0.047(0.69)	0.043**(2.48)	0.022(0.44)
ρ	0.314***(5.91)		0.520***(12.78)		0.480***(9.95)		0.413***(8.09)	
R^2	0.545		0.256		0.280		0.129	
Log-L	896.476		1001.339		1142.338		1265.606	

注：***、**、*分别表示在1%、5%、10%水平上显著性；括号内数值为z值；ρ为空间自相关系数；R^2为决定系数；Log-L为Log-Likelihood简写，为对数似然值。

间要素流动，促进周边城市生态韧性协同提升。但以经济增长为导向的土地开发利用模式使得黄河流域城市建设用地扩张速度远高于城市人口增长速度，工业生产排放的各类污染物又危害流域水环境、空气质量，加剧了生态与经济发展的失调，威胁着生态系统的活力与健康状态。此外，大气污染物、水污染物还会跨越行政边界，沿空间、沿流域进行扩散，抑制周边城市生态韧性水平提升。

社会经济环境方面，经济发展水平、公共安全建设对黄河流域城市生态韧性的直接效应均显著为正，对外开放水平的溢出效应显著为正，而政府干预程度的直接效应与溢出效应均显著为正。经济发展提质增效赋能黄河流域高质量发展，充足的经济条件为其提供物质保障，有效提升城市生态系统灾前抗压、灾后修复能力；公共安全建设有利于防范化解风险隐患，提升居民生活品质，保持生态系统持续健康运行。经济开放性会营造积极有利的竞争环境，"污染光环效应"也会通过知识、技术溢出改善周边城市生态质量。而地方政府不仅能够通过政策、资金支持提高黄河流域生态治理能力，系统性提升城市生态韧性；同时也会通过政府间"逐顶竞争"带来的示范效应辐射带动周边城市生态韧性提升。

2.3.3 异质性分析 黄河流域城市生态韧性存在空间异质性，进一步对流域三大地区分组回归(表3)，上中下游各地区城市生态韧性均存在空间溢出效应，但各影响因素作用效应存在明显差异。

降水量在上中游地区直接效应显著为正，黄河上中游流经干旱、半干旱区，尤其是宁夏、内蒙古干旱少雨，降水增加对生态恢复及林草生长有利。基础设施建设、经济发展水平的直接效应在上游地区效应最明显；上游地区经济基础薄弱，经济增长所带来制度和技术进步以及路网畅通所带来要素集聚的正外部性能为其提供重要的物质保障，强化城市生态系统应对不确定风险的自我调适能力。但经济发展水平在上中游地区还会产生虹吸效应，不利于周边城市整合资源、构建创新生态体系，甚至出现生态恶化、资源匮乏问题；下游地区产业关联度、经济发展质量高，资本人才集聚反而会通过"马歇尔外部性"使周边城市获得知识溢出效应，提升周边城市生态韧性。土地开发强度、环境污染程度的抑制作用在中游地区最为显著，中游地区涵盖我国粮食主产区与重化工能源区，城市建设用地扩张占据了更多林地、生态用地，煤矿开采活动对空气质量、地下水资源造成破坏，严重的水土流失与环境污染威胁着中游地区城市生态韧性。

与黄河流域一致，公共安全建设在上中下游地区均具有显著直接效应，但政府干预程度在上下游地区直接效应均显著为负，在中游地区产生负向溢出效应。黄河上游地区对于生态环境问题热衷于人工干预、忽视自然修复，重短期治理、轻长期预防；下游地区经济密度高、市场化程度高，政府过度

干预反而容易导致市场扭曲、寻租腐败和资源错配等现象,政府在上下游地区的干预甚至导致经济发展与生态质量间冲突愈演愈烈,加重城市生态脆弱性。而黄河中游地方政府更倾向于采取竞争型政策,不利于周边城市生态韧性协同提升。对外开放水平在上下游地区直接效应分别显著为负、显著为正,黄河上游地区对外贸易以经济附加值低且资源环境代价大的低层次产品为主,经济外向度越高越容易受到外界冲击,加剧城市生态系统的脆弱性;但在对外交流的支持下,更多的区域和多边合作也有利于进一步加强区域联动,使周边城市获得获取人才、接触外资企业的便利,发挥对外开放的技术溢出效应。而下游的山东、河南对外开放质量相对黄河其他省区更高,能够利用外资质量推动流域高质量发展,释放城市发展潜能,强化城市生态系统抵御风险的能力。

3 讨论

本文基于"压力-状态-响应-创新"框架探究黄河流域城市生态韧性时空演变及影响因素。关于城市生态韧性指标体系,相关学者主要考虑生态系统受到干扰后恢复稳定状态的能力[3,9],随着研究的深入,生态韧性更加强调通过学习创新达到长期可持续发展,因此本文借鉴王松茂等[8]的研究,新增研究与试验发展(R&D)经费投入占GDP比、人均专利授权数量指数等反映生态系统创新能力的指标,突出了创新的重要性。关于城市生态韧性时空演变特征,与珠三角地区城市生态韧性持续降低存在较大差异[14],黄河流域城市生态韧性总体逐年递增,呈现由沿海向内陆、下游向上游递减的空间分布,并进一步揭示了其空间差异的来源。关于城市生态韧性的影响因素,已有研究未涉及到城市生态韧性的空间相关性[10,16],本文运用空间杜宾模型既考虑到空间溢出效应,又考虑到空间异质性,深度剖析了黄河流域及上中下游地区的影响因素。

与此同时,本文还存在提升空间。其一,在指标体系构建时偏重于人类活动影响,未来还应当考虑自然干扰的压力以及生态系统健康状态,如干旱、水土流失等自然灾害风险以及生物多样性、景观多样性等生态指标。其二,城市群是黄河流域生态保护和高质量发展的重要载体,在贯彻落实"黄河战略"上,七大城市群体现出更高层次、更高质量的跨区域统筹协作,未来还需考虑从七大沿黄城市群不同的空间尺度来深入探究黄河流域城市生态韧性的空间关系。

4 结论

(1) 黄河流域城市生态韧性有效提升,上中下游各地区演进过程、极化特征不尽相同,上中游地区具有两极或多极分化的区域集聚特征,且中游地区分化现象更为明显,而下游地区呈轻微两极分化。

(2) 黄河流域城市生态韧性空间格局呈"下游-中游-上游"梯度递减,空间集聚与区域分异特征明显。上游地区呈"北高、南低"空间分布,中游地区由"中高-中低-低"三级梯度演变为"中高-中低"二级梯度格局,下游地区由"单中心"向"双中心"转变。

(3) 黄河流域城市生态韧性空间差异波动式下降,2011—2020年降幅达到31.20%,上中下游区域内差异也均有所降低,其中上游地区降幅最快,达到56.73%。上中下游区域间差异是黄河流域城市生态韧性空间差异的主要来源,年均贡献率高达65.44%,且上下游间差异最大,上中游间差异最小。

(4) 降水量、经济发展水平、公共安全建设对黄河流域城市生态韧性提升具有正向影响,对外开放水平存在正向溢出效应,基础设施建设、政府干预程度在提升当地城市生态韧性的过程中也呈现出正向溢出效应,而土地开发强度、环境污染程度会抑制城市生态韧性提升,且环境污染程度还存在负向溢出效应。此外,黄河上中下游各地区影响因素效果差异显著。

参考文献(References)

[1] 赵领娣, 孙兆旭. 海岸带城市经济发展质量与生态韧性协同发展演化及空间收敛特征[J]. 经济地理, 2023, 43(7): 119-129, 240. [Zhao Lingdi, Sun Zhaoxu. Evolution of coordinated development between economic development quality and ecological resilience in coastal cities and its spatial convergence features[J]. Economic Geography, 2023, 43(7): 119-129, 240.]

[2] 董洁芳, 张凯莉, 屈学书, 等. 黄河流域城市生态福利绩效测算及驱动因素研究[J]. 干旱区地理, 2023, 46(5): 834-845. [Dong Jiefang, Zhang Kaili, Qu Xueshu, et al. Measurement and influencing factors of ecological well-being performance of cities in Yellow River Basin[J]. Arid Land Geography, 2023, 46(5): 834-845.]

[3] 陶洁怡, 董平, 陆玉麒. 长三角地区生态韧性时空变化及影响因

素分析[J]. 长江流域资源与环境, 2022, 31(9): 1975-1987. [Tao Jieyi, Dong Ping, Lu Yuqi. Spatial-temporal analysis and influencing factors of ecological resilience in Yangtze River Delta[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2022, 31(9): 1975-1987.]

[4] Jin L L, Kim M, Chon J. Modeling the resilient supply of ecosystem function for climate change adaptive management in wetland city[J]. Journal of Environmental Management, 2022, 332: 115788, doi: 10.1016/j.jenvman.2022.115788.

[5] Pickett S, McGrath B, Cadenasso M, et al. Ecological resilience and resilient cities[J]. Building Research and Information, 2014, 42(2): 143-157.

[6] 宋蕾. 智能与韧性是否兼容？——智慧城市建设的韧性评价和发展路径[J]. 社会科学, 2020, 475(3): 21-32. [Song Lei. Is intelligence compatible with resilience: The resilience evaluation of smart city construction[J]. Journal of Social Sciences, 2020, 475 (3): 21-32.]

[7] Zhou Y, Chen Y, Li Z L, et al. Ecological resilience assessment of an emerging urban agglomeration: A case study of Chengdu-Chongqing economic circle, China[J]. Polish Journal of Environmental Studies, 2022, 31(3): 2381-2395.

[8] 王松茂, 牛金兰. 山东半岛城市群城市生态韧性的动态演化及障碍因子分析[J]. 经济地理, 2022, 42(8): 51-61. [Wang Songmao, Niu Jinlan. Dynamic evolution and obstacle factors of urban ecological resilience in Shandong Peninsula urban agglomeration [J]. Economic Geography, 2022, 42(8): 51-61.]

[9] 李苏, 刘浩南. 干旱区城市化与生态韧性耦合协调的时空格局演化分析——以宁夏为例[J]. 干旱区地理, 2022, 45(4): 1281-1290. [Li Su, Liu Haonan. Spatio-temporal pattern evolution of coupling coordination between urbanization and ecological resilience in arid region: A case of Ningxia Hui Autonomous Region[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(4): 1281-1290.]

[10] Shi C C, Zhu X P, Wu H W, et al. Assessment of urban ecological resilience and its influencing factors: A case study of the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration of China[J]. Land, 2022, 11(6): 921, doi: 10.3390/land11060921.

[11] Hu M M, Zhang J M, Huang J L. Assessing social-ecological system resilience in mainland China[J]. Polish Journal of Environmental Studies, 2018, 27(3): 1085-1096.

[12] Zhao R D, Fang C L, Liu H M, et al. Evaluating urban ecosystem resilience using the DPSIR framework and the ENA model: A case study of 35 cities in China[J]. Sustainable Cities and Society, 2021, 72: 102997, doi: 10.1016/j.scs.2021.102997.

[13] Li D, Yang W P, Huang R Y. The multidimensional differences and driving forces of ecological environment resilience in China [J]. Environmental Impact Assessment Review, 2023, 98: 106954, doi: 10.1016/j.eiar.2022.106954.

[14] 王少剑, 崔子恬, 林靖杰, 等. 珠三角地区城镇化与生态韧性的耦合协调研究[J]. 地理学报, 2021, 76(4): 973-991. [Wang Shaojian, Cui Zitian, Lin Jingjie, et al. Coupling relationship between urbanization and ecological resilience in the Pearl River Delta[J]. Acta Geographica Sinica, 2021, 76(4): 973-991.]

[15] 杨航, 侯景伟, 马彩虹, 等. 黄河上游生态脆弱区复合生态系统韧性时空分异——以宁夏为例[J]. 干旱区研究, 2023, 40(2): 303-312. [Yang Hang, Hou Jingwei, Ma Caihong, et al. Spatio-temporal differentiation of the composite ecosystem resilience in the ecologically fragile area in the upper reaches of the Yellow River: A case study in Ningxia[J]. Arid Zone Research, 2023, 40 (2): 303-312.]

[16] 吕添贵, 胡晗, 付舒斐, 等. 长三角地区城市生态韧性时空分异特征及影响因素[J]. 地域研究与开发, 2023, 42(1): 54-60. [Lü Tiangui, Hu Han, Fu Shufei, et al. Spatio-temporal differentiation and influencing factors of urban ecological resilience in the Yangtze River Delta[J]. Areal Research and Development, 2023, 42(1): 54-60.]

[17] 阎晓, 涂建军. 黄河流域资源型城市生态效率时空演变及驱动因素[J]. 自然资源学报, 2021, 36(1): 223-239. [Yan Xiao, Tu Jianjun. The spatio-temporal evolution and driving factors of eco-efficiency of resource-based cities in the Yellow River Basin[J]. Journal of Natural Resources, 2021, 36(1): 223-239.]

[18] 郭付友, 佟连军, 仇方道, 等. 黄河流域生态经济走廊绿色发展时空分异特征与影响因素识别[J]. 地理学报, 2021, 76(3): 726-739. [Guo Fuyou, Tong Lianjun, Qiu Fangdao, et al. Spatio-temporal differentiation characteristics and influencing factors of green development in the eco-economic corridor of the Yellow River Basin[J]. Acta Geographica Sinica, 2021, 76(3): 726-739.]

[19] 黄河东. 基于PSR模型和改进TOPSIS法的中国城市群生态质量比较研究[J]. 生态经济, 2016, 32(6): 164-167, 200. [Huang Hedong. The comparative studies on the ecological quality of China's city agglomeration based on the PSR model and the improved TOPSIS method[J]. Ecological Economy, 2016, 32(6): 164-167, 200.]

[20] 邵亦文, 徐江. 城市韧性: 基于国际文献综述的概念解析[J]. 国际城市规划, 2015, 30(2): 48-54. [Shao Yiwen, Xu Jiang. Understanding urban resilience: A conceptual analysis based on integrated international literature review[J]. Urban Planning International, 2015, 30(2): 48-54.]

[21] 李艳, 陈雯, 孙阳. 关联演化视角下地理学区域韧性分析的新思考[J]. 地理研究, 2019, 38(7): 1694-1704. [Li Yan, Chen Wen, Sun Yang. New reflections on the analysis of regional resilience in geographical sciences from a relational-dynamic perspective[J]. Geographical Research, 2019, 38(7): 1694-1704.]

[22] Boschma R. Towards an evolutionary perspective on regional resilience[J]. Regional Studies, 2015, 49(5): 733-751.

[23] 孙黄平, 黄震方, 徐冬冬, 等. 泛长三角城市群城镇化与生态环境耦合的空间特征与驱动机制[J]. 经济地理, 2017, 37(2): 163-170, 186. [Sun Huangping, Huang Zhenfang, Xu Dongdong, et al. The spatial characteristics and drive mechanism of coupling relationship between urbanization and eco-environment in the Pan Yangtze River Delta[J]. Economic Geography, 2017, 37(2): 163-170, 186.]

[24] 彭建, 吴健生, 潘雅婧, 等. 基于PSR模型的区域生态持续性评价概念框架[J]. 地理科学进展, 2012, 31(7): 933-940. [Peng Jian, Wu Jiansheng, Pan Yajing, et al. Evaluation for regional eco-

logical sustainability based on PSR model: Conceptual framework [J]. Progress in Geography, 2012, 31(7): 933−940.]

[25] 李旭辉, 王经伟. 共同富裕目标下中国城乡建设绿色发展的区域差距及影响因素[J]. 自然资源学报, 2023, 38(2): 419−441. [Li Xuhui, Wang Jingwei. The regional gap and its influencing factors of green development of urban and rural construction in China under the goal of common prosperity[J]. Journal of Natural Resources, 2023, 38(2): 419−441.]

[26] 李琳, 曾伟平. 中国城市公共健康水平的时空演化及其影响因素[J]. 地理研究, 2022, 41(10): 2760−2776. [Li Lin, Zeng Weiping. Spatio-temporal evolution and influencing factors of urban public health level in China[J]. Geographical Research, 2022, 41(10): 2760−2776.]

[27] 封亦代, 刘耀彬, 程风雨. 中国城市绿色全要素能源效率的区域差异及空间收敛[J]. 地理研究, 2023, 42(9): 2343−2368. [Feng Yidai, Liu Yaobin, Cheng Fengyu. Regional differences and spatial convergence of green total-factor energy efficiency in Chinese cities[J]. Geographical Research, 2023, 42(9): 2343−2368.]

[28] Dagum C. A new approach to the decomposition of the Gini income inequality ratio[J]. Empirical Economics, 1997, 22(4): 515−531.

[29] 车磊, 白永平, 周亮, 等. 中国绿色发展效率的空间特征及溢出分析[J]. 地理科学, 2018, 38(11): 1788−1798. [Che Lei, Bai Yongping, Zhou Liang, et al. Spatial pattern and spillover effects of green development efficiency in China[J]. Scientia Geographica Sinica, 2018, 38(11): 1788−1798.]

Spatiotemporal evolution characteristics and influencing factors of urban ecological resilience in the Yellow River Basin

ZHANG Mingdou[1], REN Yanting[1], ZHOU Liang[2]

(1. School of Economics, Dongbei University of Finance and Economics, Dalian 116025, Liaoning, China;
2. Faculty of Geomatics, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, Gansu, China)

Abstract: A scientific assessment of urban ecological resilience in China's Yellow River Basin is crucial for shaping the basin's high-quality development advantages and creating a resilient and livable environment. Based on the four-dimensional framework of "Pressure-State-Response-Innovation", this study constructs an urban ecological resilience evaluation system and investigates the temporal evolution, spatial distribution, and spatial difference characteristics of urban ecological resilience in the Yellow River Basin from 2011 to 2020 using kernel density estimation, Dagum Gini coefficient, and other methods. Moreover, it applies the spatial Durbin model to analyze its influencing factors. The results showed that: (1) The urban ecological resilience in the Yellow River Basin was effectively improved, and the evolution process and polarization characteristics of the downstream, midstream, and upstream were different. (2) The spatial pattern of urban ecological resilience showed a "downstream-midstream-upstream", gradient decline, with obvious characteristics of spatial agglomeration and regional differentiation. (3) The overall and intraregional differences in urban ecological resilience fluctuated, and inter-regional differences were the main source of spatial differences, with an annual contribution rate of 65.44%. (4) Precipitation, economic development level, and public security construction positively impacted the improvement of urban ecological resilience in the Yellow River Basin, and the opening up level had a positive spillover effect. Infrastructure construction and government intervention also showed a positive spillover effect in improving local urban ecological resilience, whereas the intensity of land development and the degree of environmental pollution would hinder the enhancement of urban ecological resilience. The degree of environmental pollution also had a negative spillover effect. In addition, significant differences were observed in the effects of the influencing factors in the downstream, midstream, and upstream of the Yellow River.

Key words: urban ecological resilience; spatiotemporal evolution; spatial difference; influencing factors; the Yellow River Basin